



# Оценка баланса солнечного излучения в мелководном море по спутниковым данным о цвете вод

**Вазюля С.В., Копелевич О.В., Шеберстов С.В.**

**Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,  
Нахимовский пр., 36, Москва 117997,  
e-mail: svershova@mail.ru; тел. (095) 129-2781.**

# Содержание

1. Введение
2. Три этапа проведения расчетов:
  - Модифицированный алгоритм атмосферной коррекции
  - Расчет оптических характеристик воды, определяющих распространение ФАР в водной толще
  - Расчет компонентов баланса ФАР на поверхности и в водной толще
3. Примеры расчетов и сравнение с результатами измерений
4. Оценка влияния дна
5. Заключение

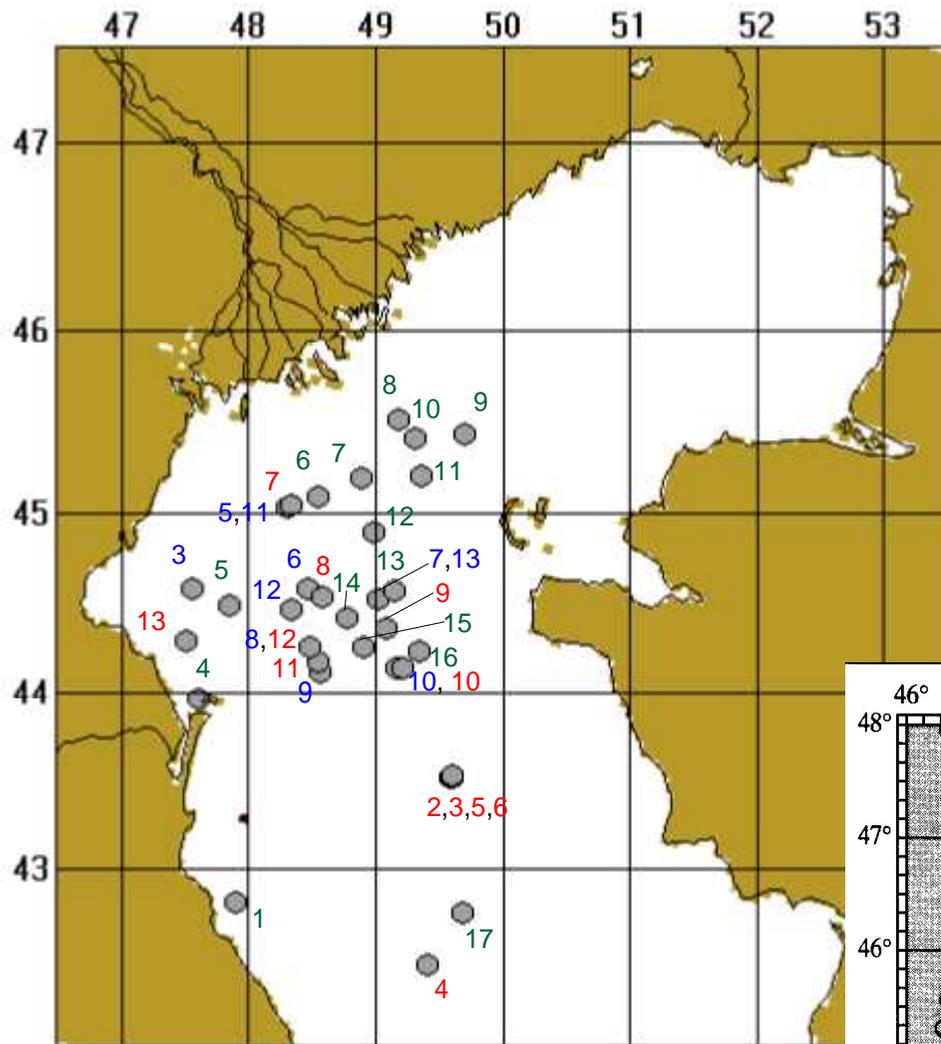
Оценка баланса солнечного излучения (ФАР) в системе атмосфера-океан необходима, так как излучение, поглощаемое океаном, определяет:

- создание первичной продукции фитопланктона
- формирование термической структуры и теплосодержание поверхностного слоя

Использование спутниковых данных – единственная возможность оценки пространственной и временной изменчивости утилизируемой ФАР в зависимости от различных факторов.

Главная особенность мелководного случая – отражение солнечного излучения от морского дна.

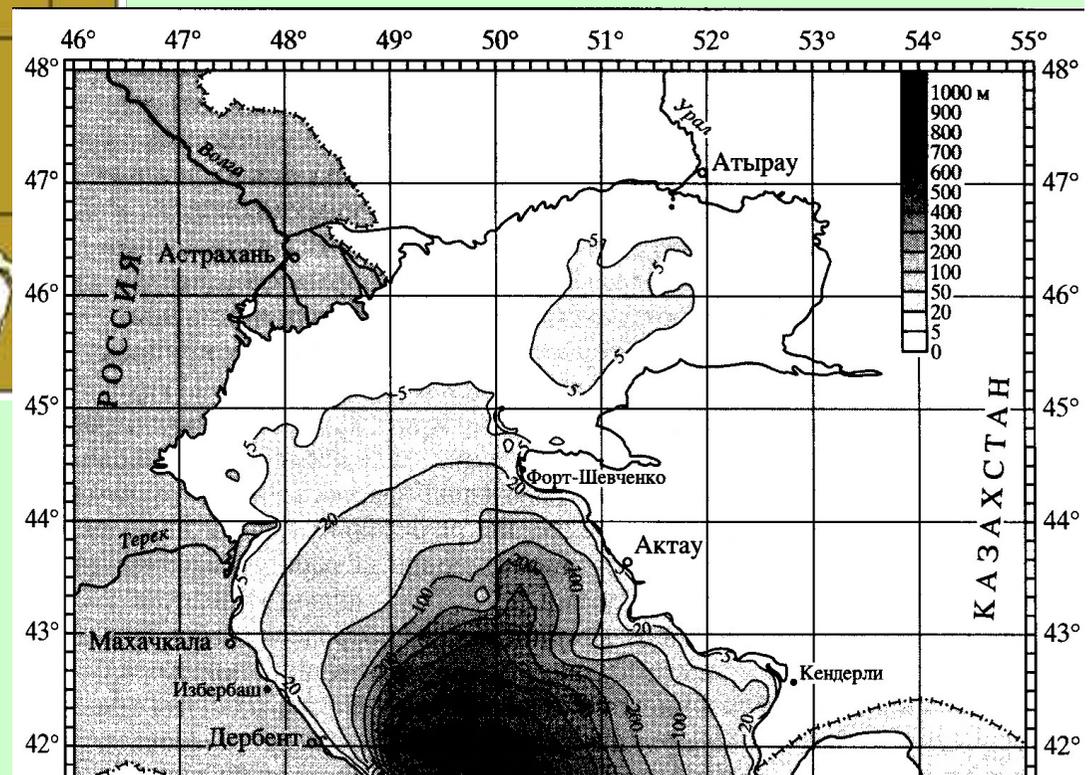
Например, знание баланса на мелководье необходимо, чтобы лучше понять механизм образования термического бара, который возникает в прибрежной области водоемов в период освобождения от ледяного покрова, либо его образования.



Расположение станций.  
 Синим цветом обозначены  
 номера станций в 2003 г.,  
 зеленым – в 2004 г.,  
 красным – в 2006 г.

В настоящей работе  
 рассматривается северная часть  
 Каспийского моря, где глубины  
 в основном меньше 15 метров.

Батиметрическая карта северной  
 половины Каспийского моря



## Два этапа обработки данных спутниковых сканеров цвета

1. Атмосферная коррекция – определение спектральных значений яркости  $L_w(\lambda)$  излучения, вышедшего из водной толщи, по спектральным значениям яркости  $L_t(\lambda)$  восходящего излучения на верхней границе атмосферы, измеренным спутниковым датчиком:

$$L_t(\lambda) = L_r(\lambda) + L_a(\lambda) + T(\lambda)L_g(\lambda) + t(\lambda)L_{wc}(\lambda) + t(\lambda)L_w(\lambda),$$

- $L_r(\lambda)$  и  $L_a(\lambda)$  – яркости, обусловленные, соответственно, рэлеевским рассеянием и многократным рассеянием аэрозолем;
- $L_g(\lambda)$  и  $L_{wc}(\lambda)$  – солнечными бликами и диффузным отражением пеной;
- $T(\lambda)$  и  $t(\lambda)$  направленное и диффузное пропускание излучения атмосферой

2. Расчет биооптических параметров воды по спектральным значениям яркости  $L_w(\lambda)$  излучения, вышедшего из водной толщи.

# Алгоритм атмосферной коррекции ИОРАН

Разработанный в ИОРАН усовершенствованный алгоритм атмосферной коррекции основан на одновременном определении аэрозольного вклада  $\rho_a(\lambda)$  и искомого спектрального коэффициента яркости моря  $\rho_w(\lambda)$  по измеренным значениям коэффициента яркости  $\rho_t(\lambda)$  восходящего излучения на верхней границе атмосферы

$$\rho_t(\lambda) = [\rho_r(\lambda) + T(\lambda) \rho_g(\lambda) + t(\lambda) \rho_{wc}(\lambda)] + \rho_a(\lambda) + t(\lambda) \rho_w(\lambda)$$

Используется параметризация спектральных функций  $\rho_a(\lambda)$  и  $\rho_w(\lambda)$  посредством нескольких базовых функций. Благодаря этому проблема сводится к нахождению нескольких весовых коэффициентов при этих базовых функциях, исходя из наилучшего соответствия измеренных и рассчитанных спектральных значений  $\rho_t(\lambda)$ .

Спектральный коэффициент яркости моря  $\rho_w(\lambda)$  представляется в виде разложения по разработанной ранее системе базовых функций  $\rho_{w1}(\lambda)$ ,  $\rho_{w2}(\lambda)$ ,  $\rho_{w3}(\lambda)$

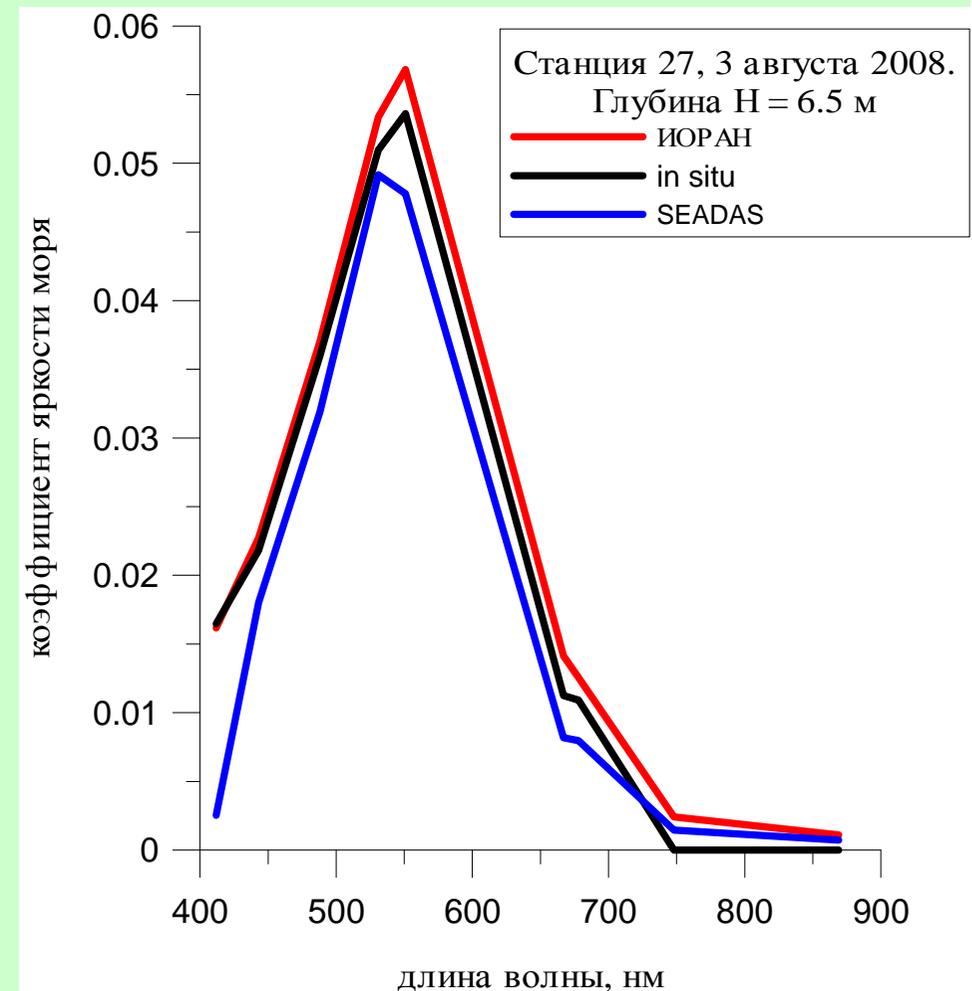
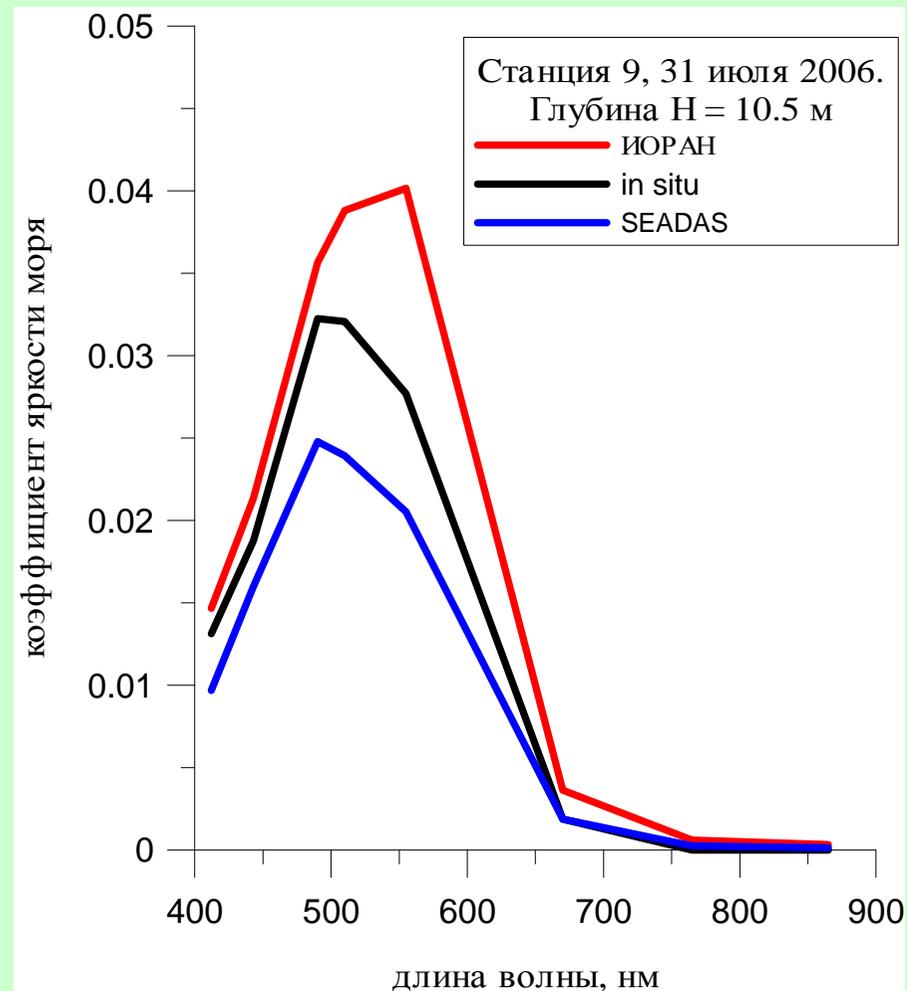
$$\rho_w(\lambda) = c_1 \rho_{w1}(\lambda) + c_2 \rho_{w2}(\lambda) + c_3 \rho_{w3}(\lambda),$$

где  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$  – искомые коэффициенты разложения (Kopelevich et al. 2007).

## Региональный алгоритм атмосферной коррекции для мелкого моря

Буренков В.И., Копелевич О.В., Шеберстов С.В., Прохоренко О.В.

Разработка региональных алгоритмов атмосферной коррекции данных спутниковых сканеров цвета. – доклад О.В. Копелевича на секции Е.



## Обращение спектрального коэффициента яркости моря с учётом отражения от дна

$$\rho_w(\lambda) = \rho_\infty(\lambda) [1 - \exp(-2K_d(\lambda) H)] + \rho_B(\lambda) \exp(-2K_d(\lambda) H),$$

где  $H$  – глубина,  $\rho_B(\lambda)$  – спектральный коэффициент отражения ото дна,  $K_d(\lambda)$  – спектральный показатель диффузного ослабления подводной облученности,  $\rho_\infty(\lambda)$  – спектральный коэффициент яркости для бесконечно глубокого океана

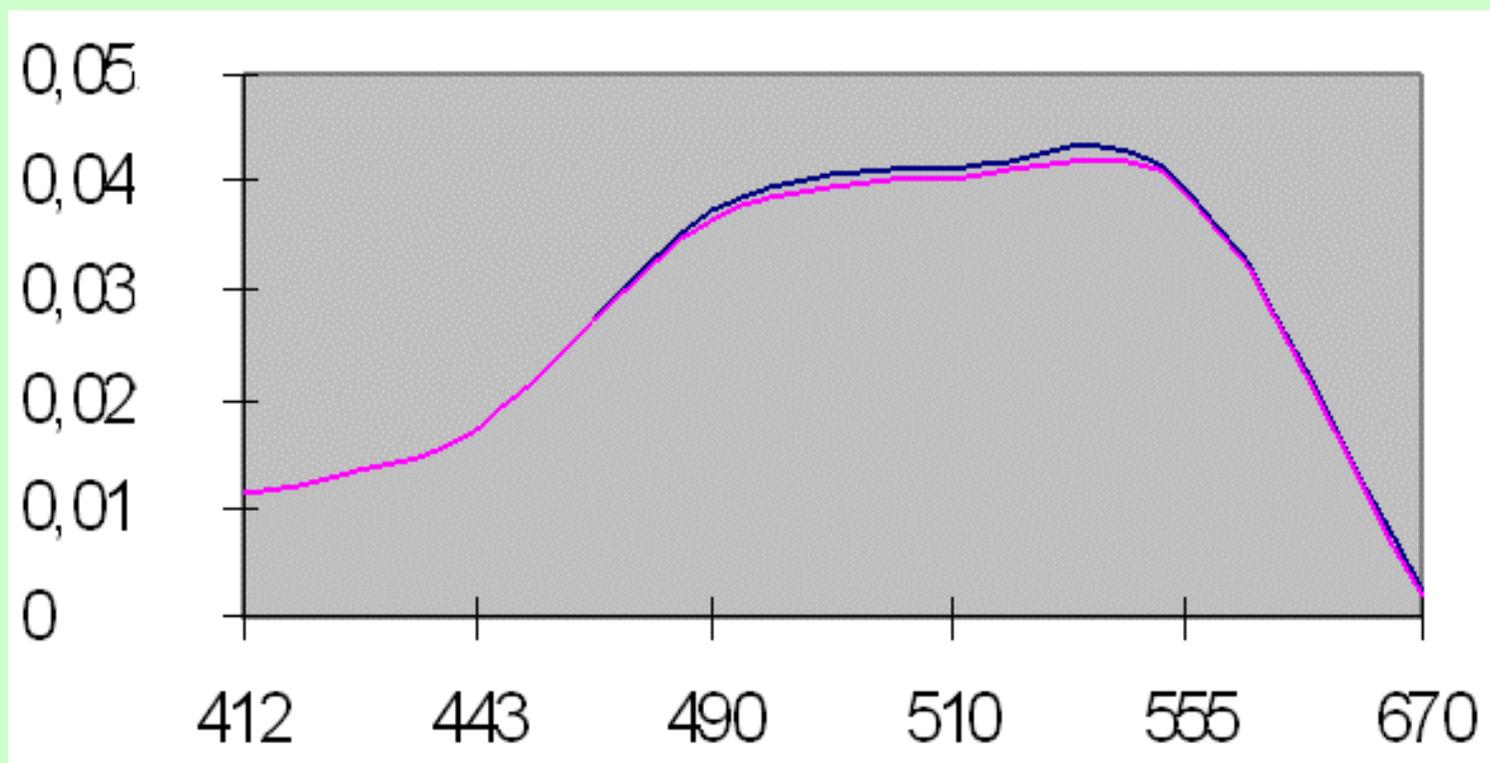
$$K_d = 1.04 D_o (a + b_b), D_o = 1/\cos\theta_w \quad \text{Gordon 1989}$$

$$\rho_\infty = 0.0922 \pi X / (1 - X), \quad \text{Morel, Gentili 1993}$$

$$\text{где } X = b_b / (a + b_b),$$

$a$  и  $b_b$  – показатели поглощения и рассеяния назад морской воды.

## Оценка точности приближенной формулы (красная) путем сравнения с расчетами точным методом (черная)



Расчеты выполнены для оптических характеристик воды на ст.13 экспедиции 2004 г., глубина 10м. Значение альбедо дна взято для белого песка  $R_B = 0.22$ . Точность приближенной формулы зависит от оптических характеристик воды: для относительно чистых вод ошибка не превышает 2 %, для более мутных – увеличивается (на краях спектра) до 15 %;

# Оптические свойства морской воды и дна

**поглощение**  $a(\lambda) = a_w(\lambda) + a_g(\lambda) + a_{ph}(\lambda)$

- поглощение РОВ  $a_g(\lambda) = \mathbf{a_g} \exp(-S(\lambda - 440))$
- поглощение пигментами  $a_{ph}(\lambda) = \mathbf{Chl} A(\lambda) \cdot \mathbf{Chl}^{-B(\lambda)}$

**рассеяние назад**  $b_b(\lambda) = b_{bw}(\lambda) + b_{bp}(\lambda)$

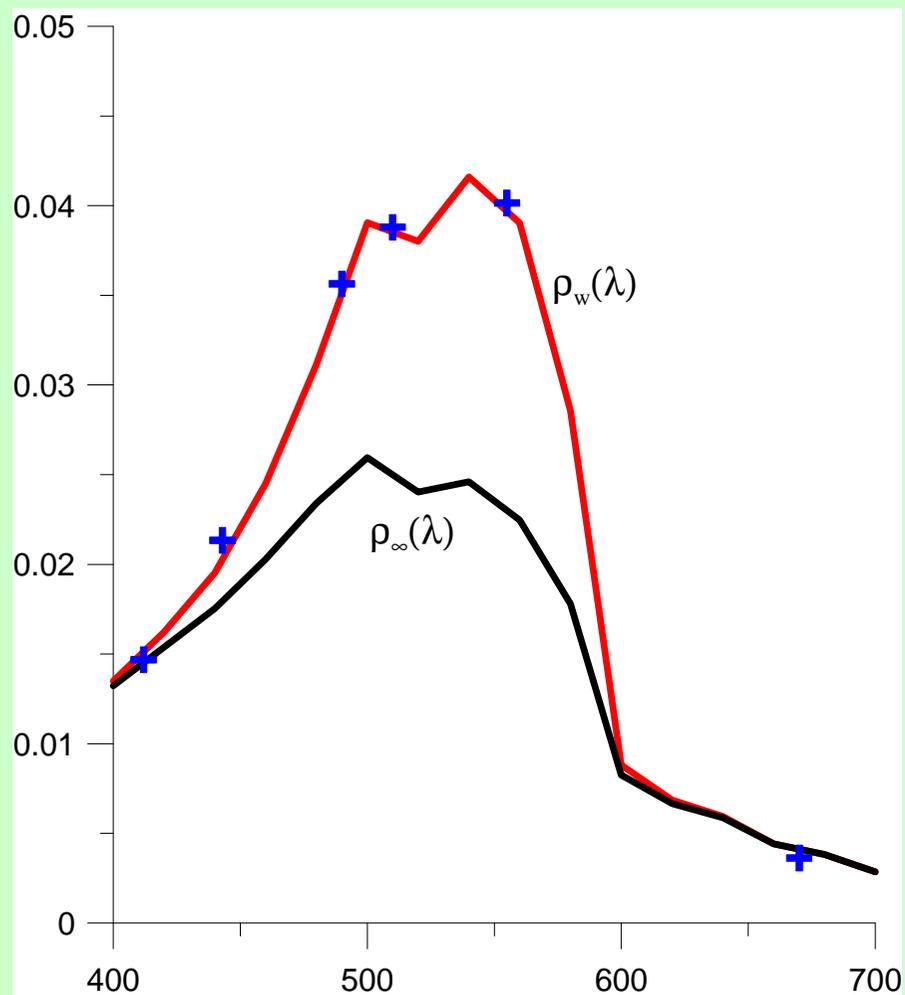
- рассеяния взвесью  $b_{bp}(\lambda) = \mathbf{b_{bp}} (\lambda/550)^{-n}$

**отражение от дна**  $\rho_B(\lambda) = \mathbf{A} f(\lambda)$

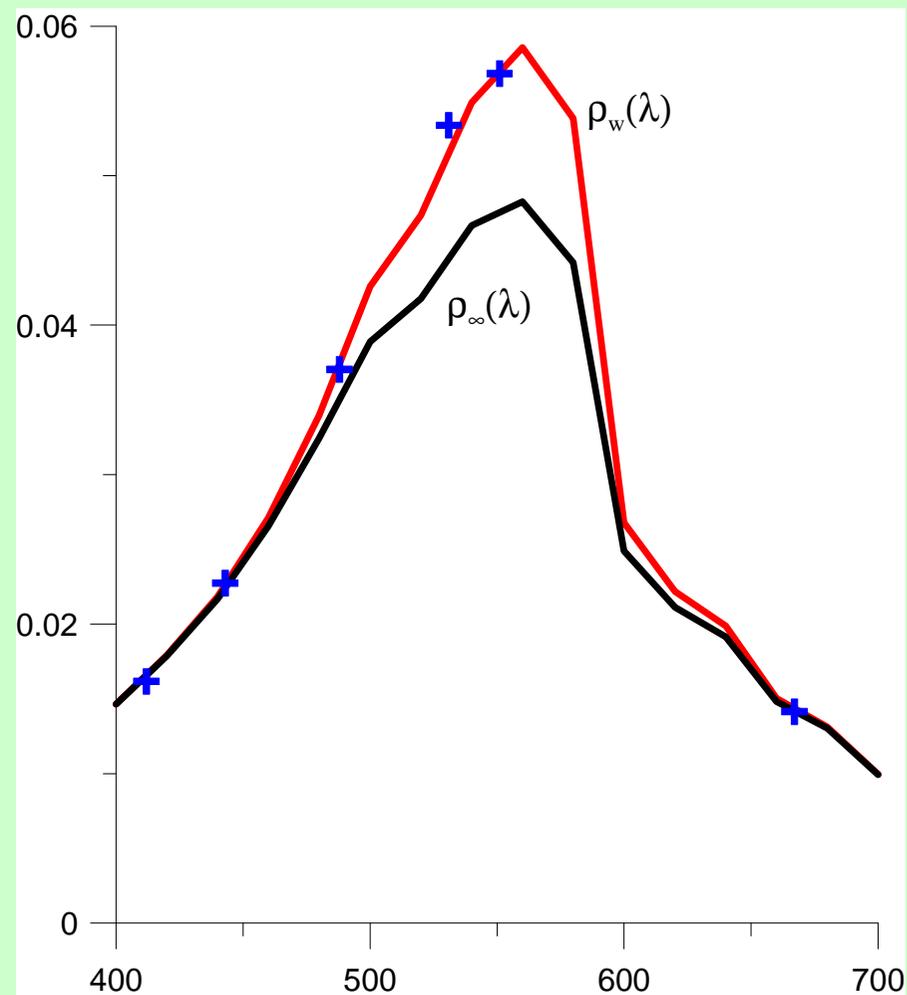
Четыре неизвестных параметра:

$\mathbf{Chl}$ ,  $\mathbf{a_g}$ ,  $\mathbf{b_{bp}}$ ,  $\mathbf{A}$

# Результаты обращения спектрального коэффициента яркости моря с учётом отражения от дна



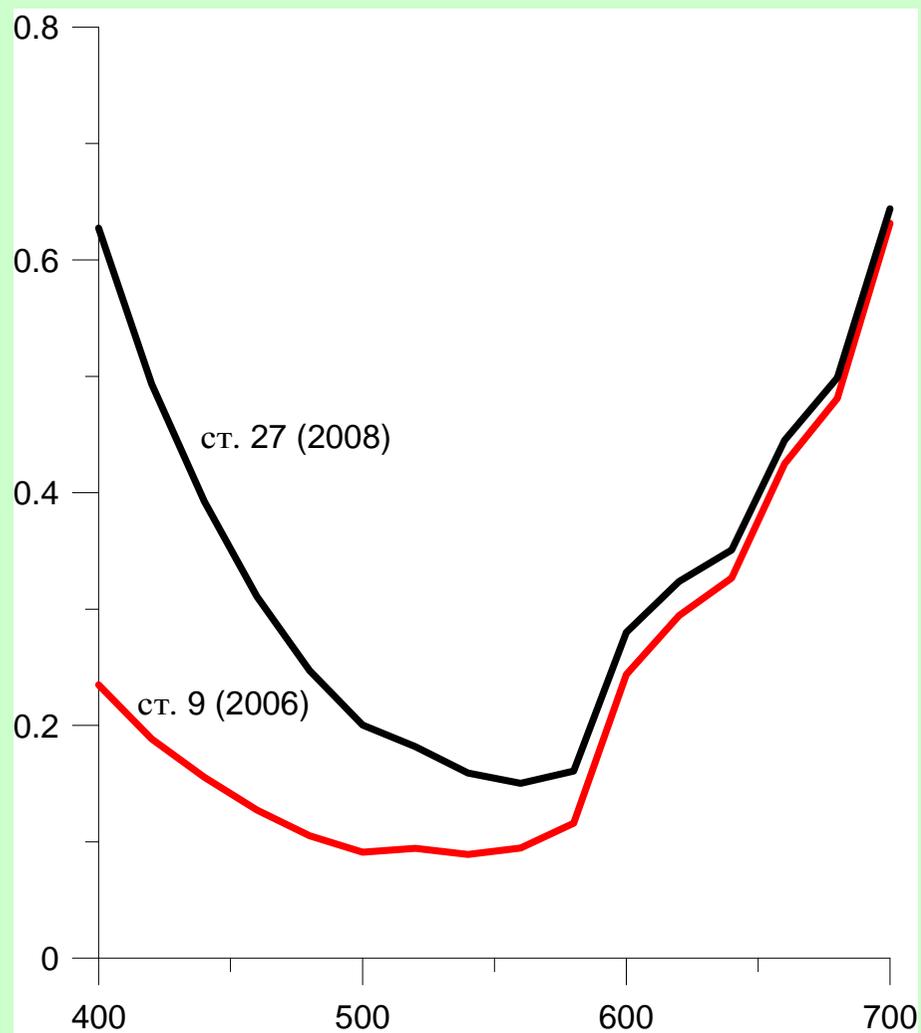
Станция 9, 31 июля 2006, H=10.5 м



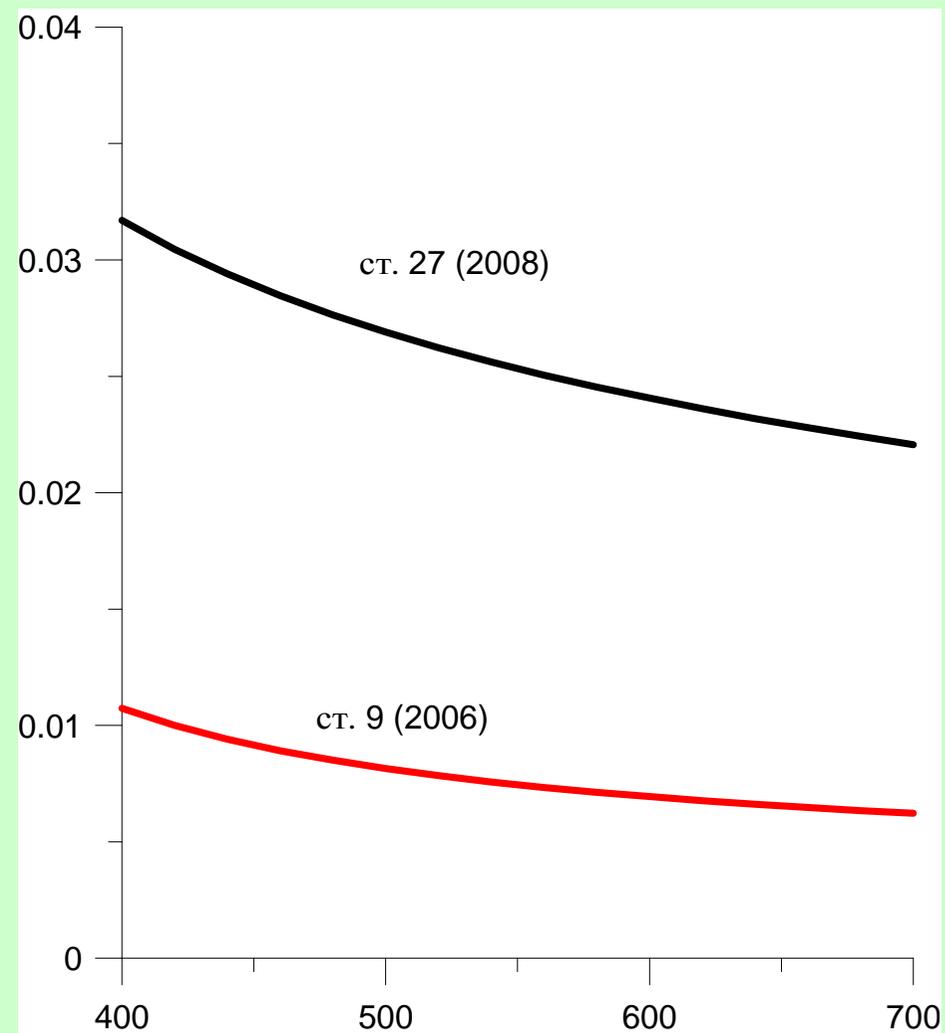
Станция 27, 3 августа 2008, H=6.5 м

## Восстановленные оптические свойства морской воды

Спектральный показатель  
поглощения морской воды,  $m^{-1}$



Спектральный показатель  
рассеяния назад морской воды,  $m^{-1}$



## Баланс на поверхности моря

$$E_d(0^-) - E_u(0^-) = E_d(0^+) - E_{\text{ref}} - E_w$$

- $E_d(0^-)$  - облученность сверху непосредственно под поверхностью воды
- $E_u(0^-)$  - облученность снизу непосредственно под поверхностью воды
- $E_d(0^+)$  - облученность сверху над поверхностью воды
- $E_{\text{ref}}$  и  $E_w$  - облученности снизу непосредственно над поверхностью воды, создаваемые, соответственно отраженным от поверхности и вышедшим из водной толщи потоками излучения.

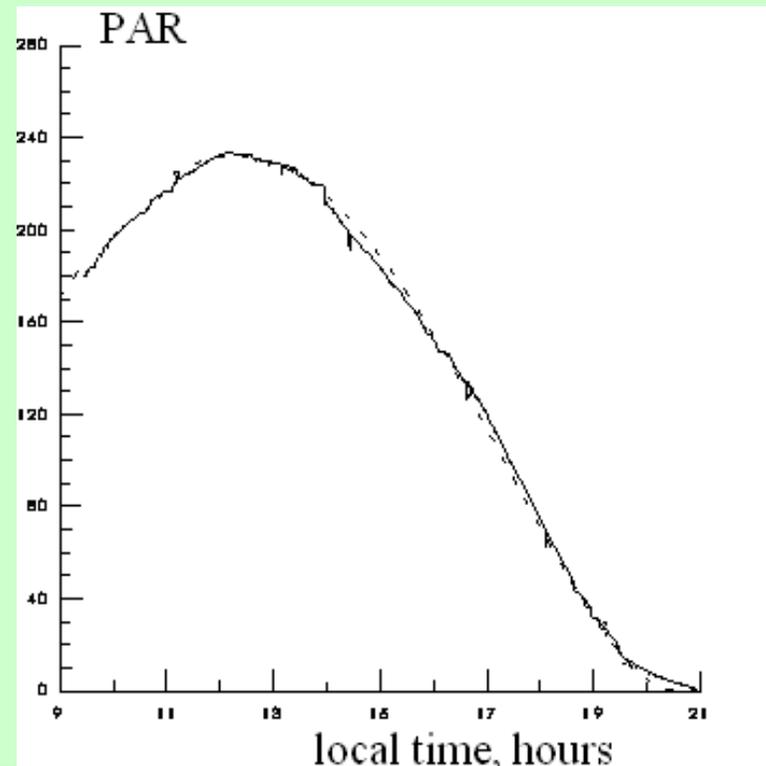
$$E_d(\lambda, 0^+) = F_0(\lambda) \cos \theta t_r(\lambda) t_a(\lambda) t_{cl}(\lambda) t_{oz}(\lambda)$$

$F_0(\lambda)$  - спектральная величина солнечной постоянной

$\theta$  - зенитный угол солнца

$t_r(\lambda)$ ,  $t_a(\lambda)$ ,  $t_{cl}(\lambda)$ ,  $t_{oz}(\lambda)$  - диффузное пропускание солнечного излучения обусловленное соответственно релеевским рассеянием, аэрозолем, облаками и озоновым слоем.

пример расчета изменения ФАР на поверхности моря по данным SeaWiFS в течение дня в сравнении с данными измерений с помощью контрольного фотометра в Баренцевом море, август 1998 (Ершова и др. 2001).



## Облученности, создаваемые отраженным от поверхности и вышедшим из водной толщи потоками излучения.

$$E_{\text{ref}} = (1-p) \cdot [r_{\text{diff}} \cdot E_{\text{diff}} + r_{\text{dir}} \cdot E_{\text{dir}}] + p \cdot r_{\text{wcap}} \cdot (E_{\text{dir}} + E_{\text{diff}}),$$

где  $r_{\text{diff}}$ ,  $r_{\text{dir}}$  коэффициенты отражения для прямой и диффузной компонент нисходящего излучения  $E_{\text{dir}}$  и  $E_{\text{dif}}$ ,  $r_{\text{wcap}}$  коэффициент отражения пены, а  $p$  доля поверхности занятая пеной.  $r_{\text{dir}}$ ,  $r_{\text{dif}}$ ,  $r_{\text{wcap}}$  и  $p$  зависят от скорости ветра.

В предположении изотропности:

$$E_w(\lambda) = \pi L_w(\lambda),$$

где  $L_w(\lambda)$  яркость вышедшего из воды излучения.

Величина  $L_w(\lambda)$  рассчитывается в зависимости от высоты Солнца и диффузного пропускания атмосферы для солнечного излучения  $t(\lambda)$ :

$$L_w(\lambda) = L_{\text{wN}}(\lambda) t(\lambda) \cos\theta,$$

где  $\theta$  – зенитный угол Солнца,  $L_{\text{wN}}$  – нормализованная яркость, которая находится через  $\rho_w(\lambda)$ :

$$L_{\text{wN}}(\lambda) = F_0(\lambda) 0.165 \rho_w(\lambda) / (1 - 0.497 \rho_w(\lambda))$$

## Облученности сверху и снизу непосредственно под поверхностью воды

$$E_d(0^-) = E_u(0^-) R(0^-),$$

где  $R(0^-)$  коэффициент диффузного отражения водной толщи.

С учетом отражения ото дна:

$$R(0^-) = R_\infty + [R_B - R_\infty] \exp(-2 K_d H),$$

где  $R_\infty$  коэффициент диффузного отражения водной толщи для бесконечно глубокого океана, а  $R_B(\lambda) = \rho_B(\lambda)$  - коэффициент отражения от дна.

Величины  $R_\infty$  рассчитываются через  $\rho_\infty$ :

$$R_\infty(\lambda) = \rho_\infty \cdot Q/\pi,$$

значения  $Q$  для зависит от длины волны, высоты Солнца и концентрации хлорофилла (Morel, Mueller, 2003).

Из уравнения

$$E_d(0^-) - E_u(0^-) = E_d(0^+) - E_{\text{ref}} - E_w$$

находим

$$E_d(0^-) = (E_d(0^+) - E_{\text{ref}} - E_w)/(1 - R(0^-))$$

## Расчеты нисходящей $E_d(z)$ и восходящей $E_u(z)$ в зависимости от глубины $z$

$$E_d(z) = E_d(0^-) \exp [-K_d z]$$

$$E_u(z) = R_\infty E_d(z) + (R_B - R_\infty) E_d(z) e^{-2 K_d (H-z)}$$

### Объемное поглощение в водной толще

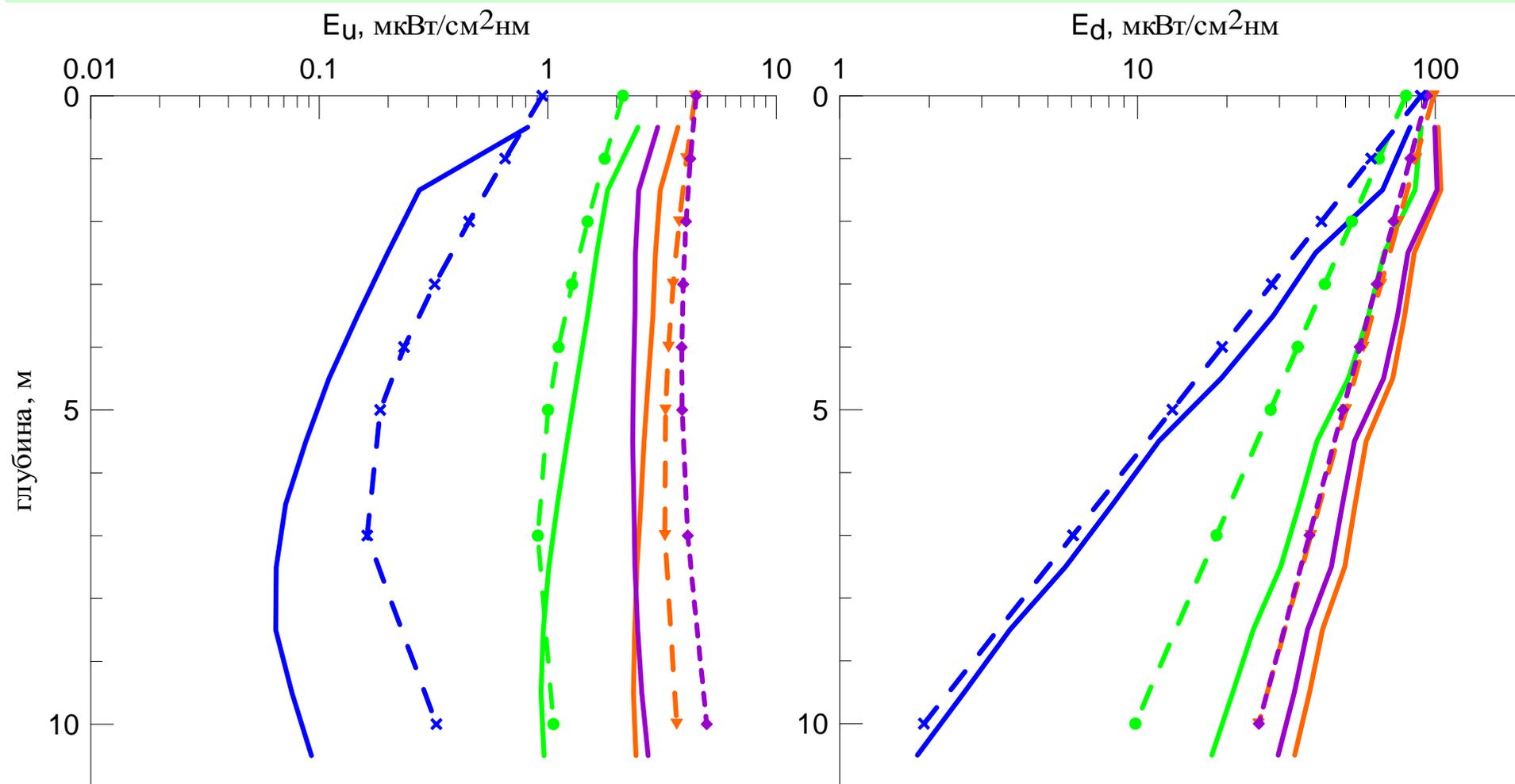
исходя из баланса лучистой энергии в рассматриваемом слое

$$\Delta z = z_2 - z_1$$

$$E_{\text{abs}}(\Delta z) = E_d(z_1) - E_d(z_2) + E_u(z_2) - E_u(z_1),$$

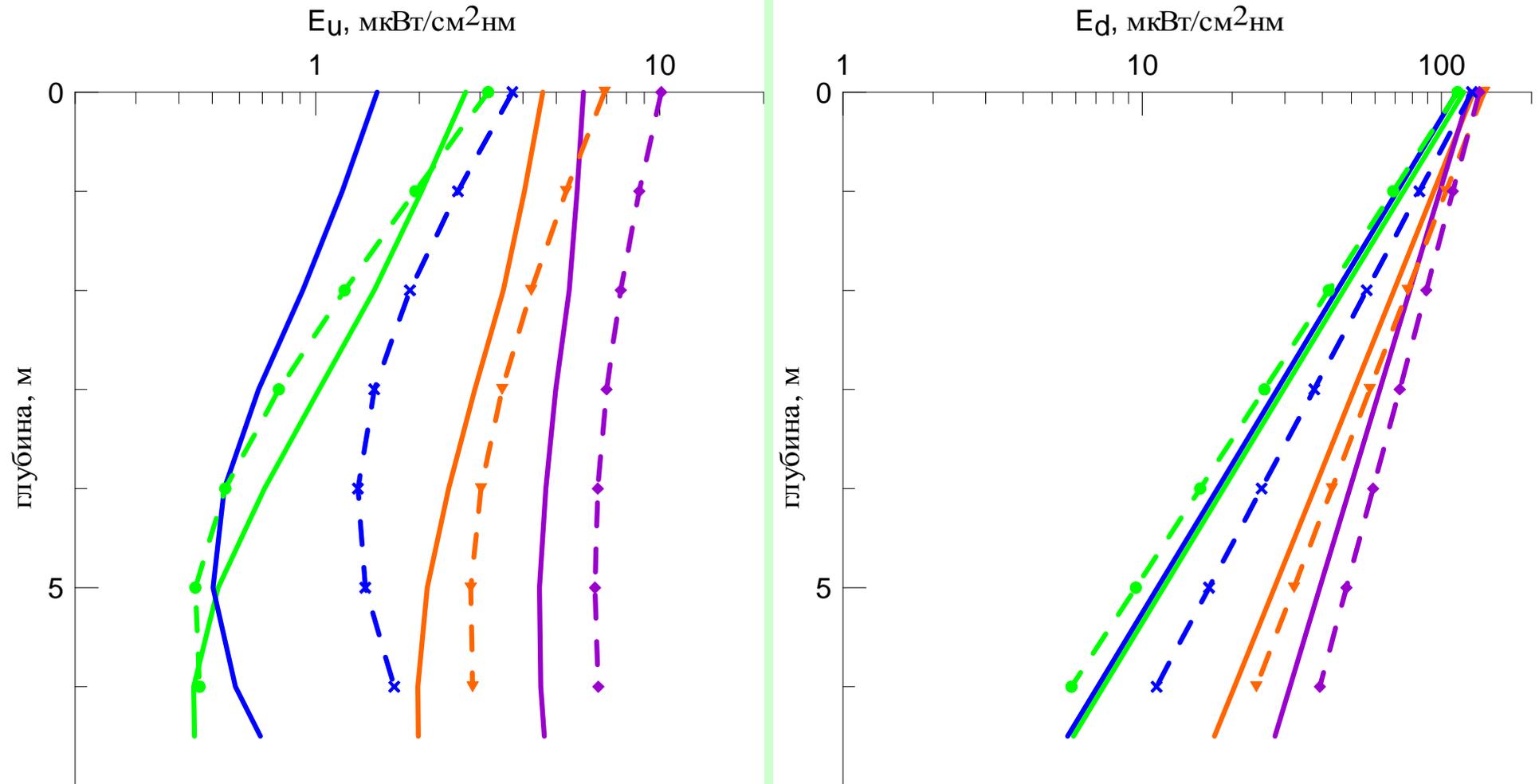
где  $E_d(z_1)$ ,  $E_d(z_2)$  – величины подводной облученности сверху на горизонтах  $z_1$  и  $z_2$ ;  $E_u(z_2)$ ,  $E_u(z_1)$  – величины облученности снизу на этих горизонтах.

## Станция 9, 31 июля 2006, H=10.5 м



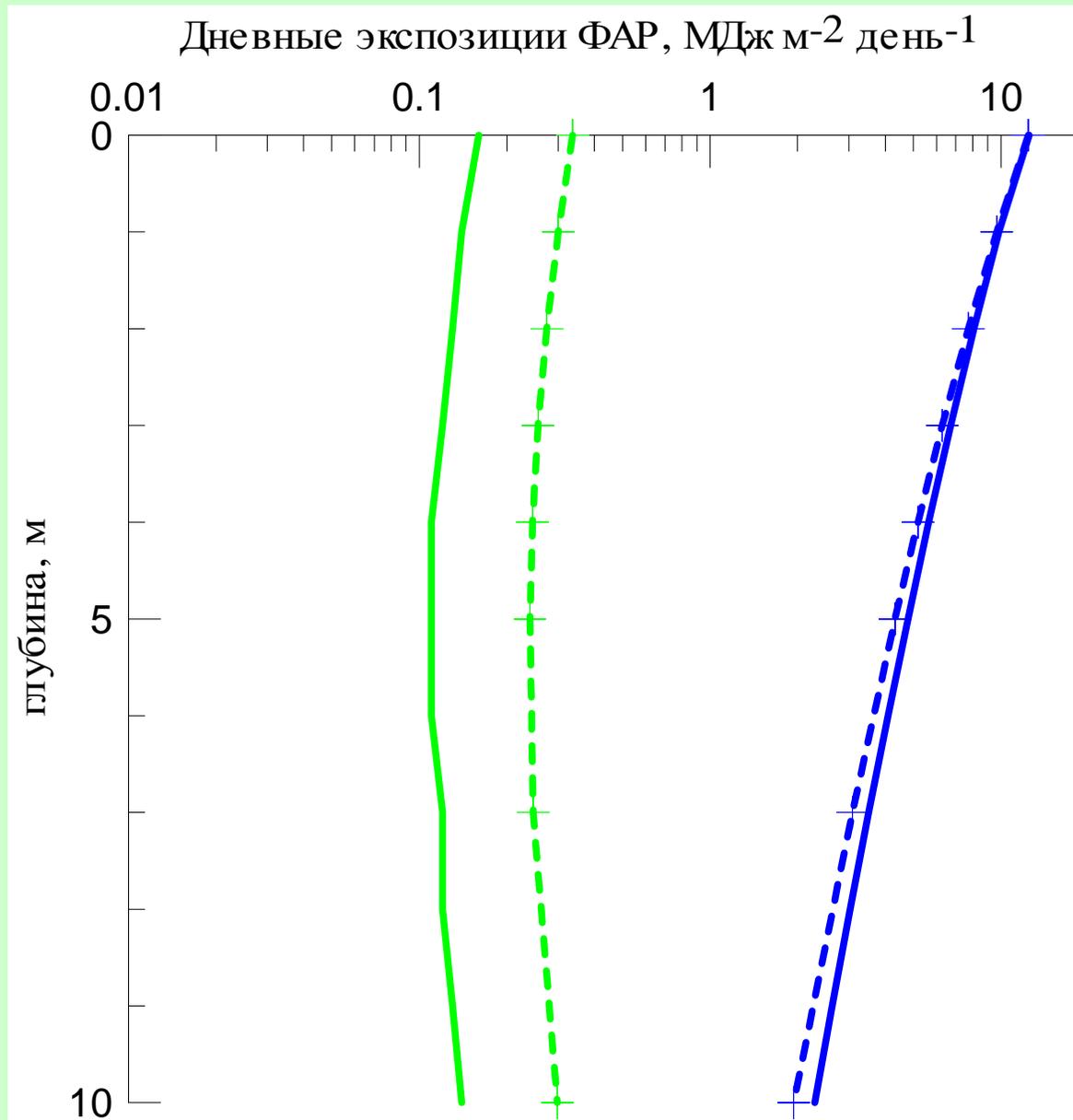
Сравнение рассчитанных по данным SeaWiFS (пунктирные линии) и измеренных (сплошные) спектральных мгновенных величин  $E_d(z, \lambda)$  и  $E_u(z, \lambda)$  для  $\lambda=443$  нм зелёным цветом, 490 нм – оранжевым, 555 нм – фиолетовым и 626 нм – синим.

# Станция 27, 3 августа 2008, H=6.5 м



Сравнение рассчитанных по данным MODIS (пунктирные линии) и измеренных (сплошные) спектральных мгновенных величин  $E_d(z, \lambda)$  и  $E_u(z, \lambda)$  для  $\lambda=443$  нм зелёным цветом, 490 нм – оранжевым, 555 нм – фиолетовым и 626 нм – синим.

# Дневные экспозиции ФАР



$$\Phi AP = \int_{400}^{700} E(\lambda) d\lambda$$

Дневные экспозиции ФАР, рассчитанные по данным SeaWiFS (пунктирные линии) и по данным измерений (сплошные) для нисходящего потока излучения обозначены синим цветом, для восходящего – зелёным. Станция 9, 31 июля 2006, Н=10.5 м

## Объемное поглощение в в разных слоях

$$\Phi AP_{abs}(\Delta z) = \Phi AP_d(z_1) - \Phi AP_d(z_2) + \Phi AP_u(z_2) - \Phi AP_u(z_1)$$

СЛОЙ, м	Станция 8, Н=12 м			Станция 9, Н=10.5 м		
	по результатам измерений	по спутниковым данным	различия, %	по результатам измерений	по спутниковым данным	различия, %
<b>0 - 1</b>	<b>2.82</b>	<b>2.48</b>	<b>-12.2</b>	<b>2.65</b>	<b>2.70</b>	<b>1.9</b>
<b>1 - 2</b>	<b>1.74</b>	<b>1.77</b>	<b>1.9</b>	<b>1.76</b>	<b>1.93</b>	<b>9.5</b>
<b>2 - 3</b>	<b>1.25</b>	<b>1.32</b>	<b>5.6</b>	<b>1.36</b>	<b>1.43</b>	<b>4.8</b>
<b>3 - 4</b>	<b>0.92</b>	<b>1.02</b>	<b>10.3</b>	<b>1.05</b>	<b>1.09</b>	<b>2.7</b>
<b>4 - 5</b>	<b>0.72</b>	<b>0.80</b>	<b>11.5</b>	<b>0.87</b>	<b>0.85</b>	<b>-1.9</b>
<b>5 - 7</b>	<b>1.00</b>	<b>1.19</b>	<b>18.7</b>	<b>1.28</b>	<b>1.24</b>	<b>2.8</b>
<b>7 - 10</b>	<b>0.90</b>	<b>1.16</b>	<b>29.0</b>	<b>1.25</b>	<b>1.20</b>	<b>4.0</b>

## Объемное поглощение ФАР в разных слоях в процентах от величины ФАР на поверхности

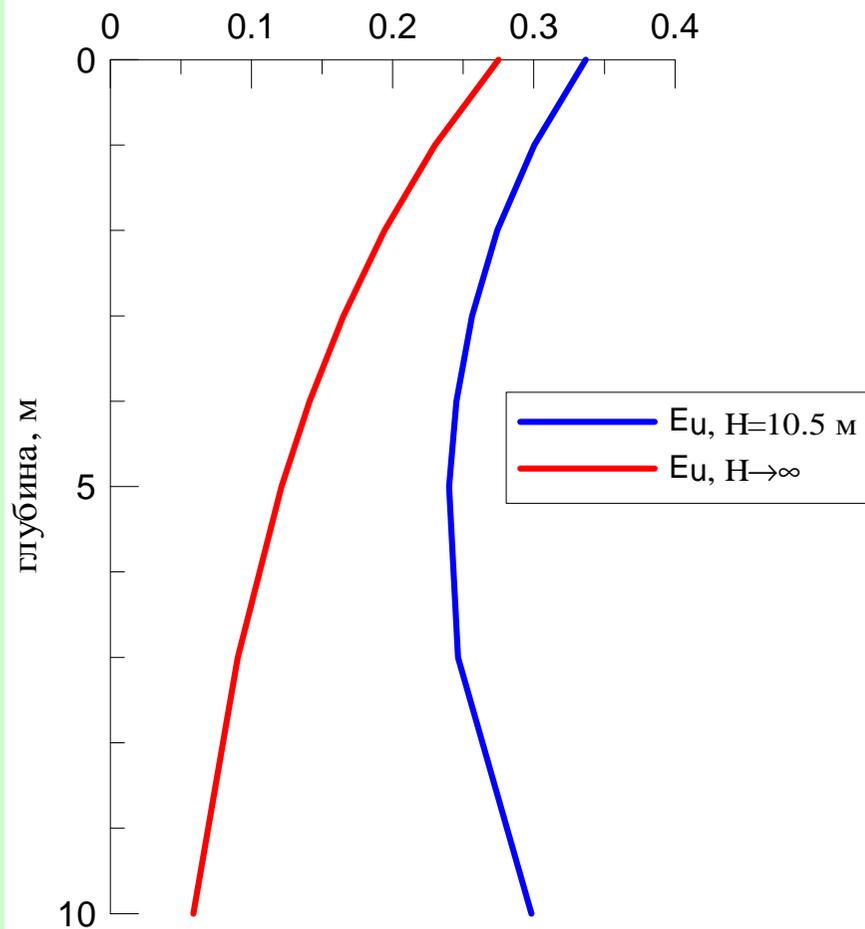
слой, м	Станция 2, 2006, H=60.5 м	Станция 8, 2006, H=12 м	Станция 9, 2006, H=10.5 м	Станция 27, 2008, H=6.5 м
<b>0 - 1</b>	<b>20.0</b>	<b>20.9</b>	<b>22.4</b>	<b>33.0</b>
<b>1 - 2</b>	<b>14.4</b>	<b>15.0</b>	<b>16.0</b>	<b>21.0</b>
<b>2 - 3</b>	<b>10.7</b>	<b>11.2</b>	<b>11.8</b>	<b>13.8</b>
<b>3 - 4</b>	<b>8.3</b>	<b>8.6</b>	<b>9.0</b>	<b>9.4</b>
<b>4 - 5</b>	<b>6.6</b>	<b>6.8</b>	<b>7.1</b>	<b>6.6</b>
<b>5 - 7</b>	<b>9.8</b>	<b>10.0</b>	<b>10.3</b>	
<b>7 - 10</b>	<b>9.6</b>	<b>9.8</b>	<b>9.9</b>	

# Влияние отражения ото дна

Влияние отражения ото дна можно наглядно продемонстрировать путем расчета в предположении  $H \rightarrow \infty$ .

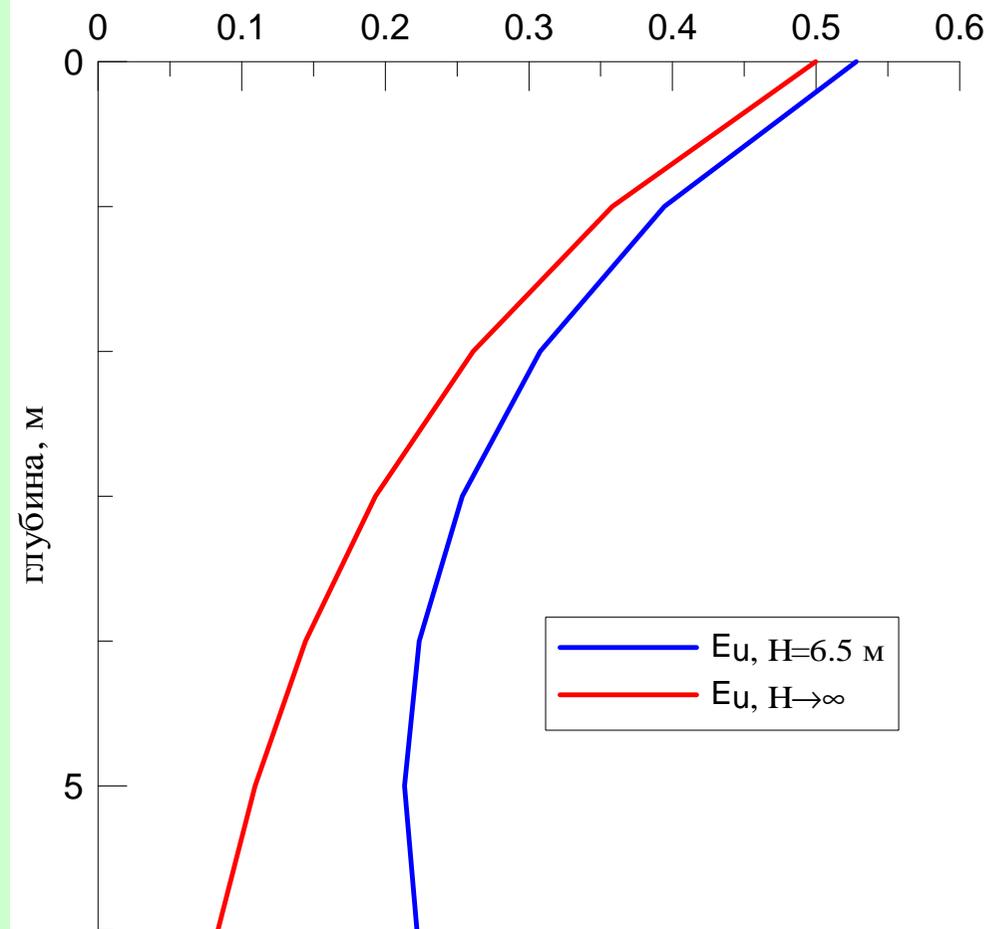
## Станция 9, 2006

Дневные экспозиции ФАР, МДж м<sup>-2</sup> день<sup>-1</sup>



## Станция 27, 2008

Дневные экспозиции ФАР, МДж м<sup>-2</sup> день<sup>-1</sup>



## Заключение

- Разработан алгоритм для оценки баланса солнечного излучения (ФАР) в мелководном море по спутниковым данным о цвете вод
- Но требуется его дальнейшее усовершенствование, особенно это касается уменьшения ошибок атмосферной коррекции и создания корректной региональной модели оптических свойств морской воды, а также необходимо дополнительное исследование спектрального коэффициента отражения от дна
- Для этого требуется проведение дальнейших натурных комплексных исследований в сочетании с одновременными спутниковыми наблюдениями.

# Спасибо за внимание

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта  
РФФИ № 07-05-00799 и Программы фундаментальных  
исследований №17 Президиума РАН